

吉林省东部气象因子与玉米延迟型冷害的时空演变规律

赵 静¹, 张继权¹, 李 颖², 郭恩亮³, 冯 玉², 王 蕊¹

(1. 东北师范大学 环境学院自然灾害研究所, 长春 130117; 2. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 3. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022)

摘 要: 基于 1980—2014 年吉林东部地区逐日气象数据和玉米种植资料, 利用 Mann-Kendall 突变分析法、气候倾向率、偏最小二乘回归分析等方法, 揭示了气候变化背景下冷害的时空演变规律, 同时对影响冷害的气象因子进行探究。结果表明: (1) 近 35 年热量条件有所改善, 冷害呈现减少趋势。20 世纪 80 年代, 冷害受低温阴雨、早霜等天气影响表现为发生频率高、强度大, 20 世纪 90 年代气温升高, 冷害发生频率降低, 中期降水异常增加, 冷害强度增大, 21 世纪气温大幅提高, 冷害少有发生, 但不排除区域极端低温的可能; (2) 吉林东部地区气候整体变暖且初霜日推迟, 降水量南多北少, 日照时数东升西降。而冷害发生频率空间分布规律为随着生育期推进冷害高频区逐渐由中部山区向高纬度延伸, 即高纬度、高海拔地区成为冷害的高发区; (3) 玉米在出苗—抽雄期受低温影响较大, 冷害年气温受各气象因子的影响大小为降水量>日照时数>初霜日, 尤其高海拔山区多阴雨寡照天气, 易发生冷害。

关键词: 低温冷害; 气象因子; 时空分布; 吉林省东部

中图分类号: X43

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0266-07

Temporal and Spatial Evolution of Meteorological Factors and Delayed Chilling Damage in Eastern Jilin Province

ZHAO Jing¹, ZHANG Jiquan¹, LI Ying², GUO Enliang³, FENG Yu², WANG Rui¹

(1. School of Environment and Natural Disaster Research Institute, Northeast Normal University, Changchun 130117, China; 2. School of Urban Planning and Environment Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China; 3. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data and maize planting data from 1980 to 2014 in eastern Jilin Province, Mann-Kendall mutation analysis, climate propensity and partial least-squares regression analysis were used to reveal the spatial and temporal evolution of chilling damage in the context of climate change. At the same time, the meteorological factors that affect chilling damage were analyzed. The results showed that: (1) heat condition had been improved in the past 35 years, and the chilling damage presented the decreasing trend; In the 1980s, cold damage was affected by the weather such as low temperature overcast and rainy weather, early frost and so on, the occurrence frequency and intensity were high; In the 1990s, with the increase of temperature and the anomalous increase of mid-term precipitation, the frequency of chilling damage decreased, but intensity increased; cold damage rarely occurred due to the significantly warmer temperature in the 21 st century, but did not rule out the possibility of extreme low temperatures in the region; (2) climate in eastern Jilin Province warmed up and the initial frost date was delayed, with more precipitation in the south and less in the north, and the sunshine hours were rising in eastern part and declining in the west; however, the frequency of chilling damage showed that the high frequency zone of chilling damage gradually extended from the central mountain area to high latitude area as the growth period progressed, which meant that high latitudes and high altitude areas became the high incidence areas of chilling damage; (3) maize was greatly affected by the low temperature in the emergence-tasseling stage, the impact of mete-

收稿日期: 2018-03-19

修回日期: 2018-03-27

资助项目: 国家自然科学基金(41571491); 公益性行业(气象)科研专项储备项目(GYHY201506001-6); 中央高校基本科研业务费专项资金(2412016KJ046)

第一作者: 赵静(1995—), 女, 安徽省安庆市人, 硕士生, 研究方向为农业气象灾害风险评估等方面。E-mail: zhaoj870@nenu.edu.cn

通信作者: 张继权(1965—), 男, 吉林九台人, 教授, 博士生导师, 主要从事综合灾害风险评估与管理等方面研究。E-mail: zhangjq022@nenu.edu.cn

orological factor on temperature decreased in the order: the amount of precipitation> sunshine hours> early frost days; more rainy weather in high altitude area was prone to chilling damage.

Keywords: chilling injury ; meteorological factors; temporal and spatial distribution; east of Jilin province.

低温冷害是指作物在生长期遭受低温,导致作物生育延迟、生理障碍并引起减产的自然灾害。20 世纪 60 年代末起,东北地区多次发生大范围严重冷害,造成粮食减产高达百亿斤^[1],引起社会各界广泛关注。随着全球气候变暖,作物生长季的热量条件得到改善,但是极端气候事件的频繁发生以及中晚熟品种种植区的盲目北扩^[2],导致区域性、阶段性低温冷害仍有发生^[3],造成的损失亦在增加^[4]。进入 21 世纪后,低温冷害的发生频率较 20 世纪后 20 a 呈明显增加趋势^[5]。2008 年我国大部分地区遭遇低温雨雪冷冻灾害,造成作物受灾面积高达 1 469.5 万 hm^2 ,直接经济损失 1 696.4 亿元,超过 2008 年气象灾害总经济损失的 50%^[6]。2010 年华北、东北及新疆北部发生近 40 a 罕见冬春低温事件,造成直接经济损失超过 60 亿元^[7]。2013 年 4 月,吉林省发生罕见低温春涝灾害,作物受灾总面积达 62.3 万 hm^2 ,直接经济损失约为 113.1 亿元^[8]。低温冷害不仅对我国粮食生产安全产生巨大威胁,也是我国影响地域广、减产幅度大的农业气象灾害之一。

关于玉米低温冷害的研究较早,研究者基于冷害作用机理建立了多种玉米低温冷害判定指标体系^[9-11],分析低温冷害对玉米产量、生育期及种植格局的影响^[12]。随着全球气候变化复杂性增加,“风险”已经引入玉米低温冷害的研究领域,其研究关键是对冷害危险性进行辨识并揭示其时空分布规律。但是以往的研究往往忽略了冷害过程常与阴雨、寡照和早霜等天气过程相伴,对喜温、喜光的玉米生长发育十分不利^[13-14]。有研究对低温阴雨、低温寡照等方面进行分析^[15-16]。归纳起来主要存在 3 方面不足:一是已有研究多局限于单一温度指标对冷害展开研究,忽略气候的复杂性,无法概括冷害过程中现实天气变化情况;二是多关注冷害与单一气象要素耦合特征,研究区域多为南方,缺少北方作物规律分析;三是多气象因子特征分析多从天气变化角度分析,较少与作物生长阶段的灾害耦合。基于此,本研究从作物生长期的温度、降水、日照等气象要素变化特征入手,结合全球气候变化背景下复杂的天气过程对玉米生育期延迟型冷害进行时空分布特征评估,并对典型冷害年的气象条件进行相关性分析,以此深入解析冷害发生的影响因子及其定量关系,为冷害的防治预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

吉林东部地区($124^{\circ}\text{—}131^{\circ}\text{E}$, $41^{\circ}\text{—}45^{\circ}\text{N}$)包括延边朝鲜族自治州、白山市、通化市 3 个地市级行政单位(图 1),属张广才岭和龙岗山及其以东的长白中山低山区,呈南高北低的地势地貌特征;为温带大陆性季风气候,气候温凉湿润,日照条件差。全区年平均气温为 $2\sim 6^{\circ}\text{C}$,最热月平均气温 $19\sim 23^{\circ}\text{C}$,平均气温呈现明显的增加趋势,集安为高温中心,长白附近为低值中心。年降水量约 389~694 mm,长白附近为高值中心,以西部梅河口为低值中心。年平均日照时数为 2 499.8 h,东南地区下降显著。初霜日多出现在 9 月下旬,呈显著推迟趋势^[17]。

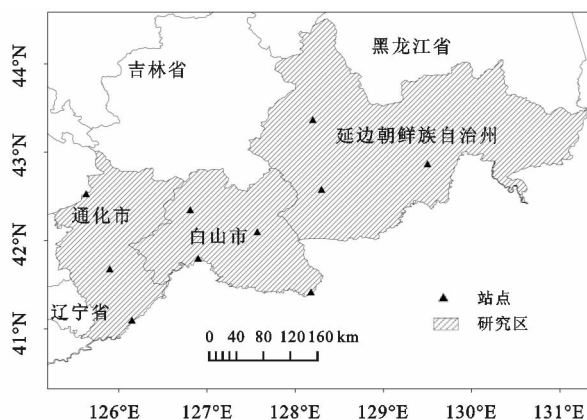


图 1 研究区及农业气象观测站分布

1.2 指标选取

选取吉林省东部地区均匀分布的 10 个农业气象观测站为研究站点,1980—2014 年逐日温度、降水量、日照时数、最低温度资料及 1980—2010 年玉米生育期资料均来自国家信息中心资料室。根据中国气象局 2013 年《北方春玉米冷害评估技术规范(QX/T167—2012)》^[18]气象行业标准,选取研究区 5—9 月逐月平均气温之和与同期多年平均值的距平为玉米延迟型冷害的致灾因子(表 1),将东北地区玉米延迟型冷害划分为轻度、中度、重度 3 个等级。此外,针对不同熟制的玉米品种的七叶期、抽雄期和乳熟期,利用出苗至当前发育期的大于或等于 10°C 的积温距平值,估算春玉米生长阶段受冷害影响的可能性(表 2)。

1.3 研究方法

1.3.1 气象因子筛选 冷害可划分为低温阴雨型、

低温寡照型、低温干旱型和低温早霜型等。参考冷害类型,选取玉米全生育期内逐日气温、总降水量、总日照时数,并将地面 0 cm 日最低地温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的第一天作为初霜日期,取 1 月 1 日为 1,建立初霜日序列。由

于部分站点玉米发育期观测数据缺失,本文根据物候定律推算各气象站点玉米发育期^[19],考察冷害年玉米不同生育阶段的降水量、日照时数、初霜日与温度的相关性,探究冷害发生的原因。

表 1 北方春玉米冷害强度指标

延迟型冷害级别	$\sum T_{5-9}/^{\circ}\text{C}$					
	(0,80]	(80,85]	(85,90]	(90,95]	(95,100]	(100,105]
轻度冷害 $\Delta T_{5-9}/^{\circ}\text{C}$	-1.4~-1.1	-1.9~-1.4	-2.4~-1.7	-2.9~-2.0	-3.1~-2.2	-3.3~-2.3
中度冷害 $\Delta T_{5-9}/^{\circ}\text{C}$	-1.7~-1.4	-2.4~-1.9	-3.1~-2.4	-3.7~-2.9	-4.1~-3.1	-4.4~-3.3
重度冷害 $\Delta T_{5-9}/^{\circ}\text{C}$	≤ -1.7	≤ -2.4	≤ -3.1	≤ -3.7	≤ -4.1	≤ -4.4

注: $\sum T_{5-9}$ 为 5—9 月平均气温之和的多年平均值; ΔT_{5-9} 为当年 5—9 月平均气温之和的距平值。

表 2 北方春玉米生长季冷害动态评估指标

发育期	积温距离平 $\text{Ha}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$		冷害发生的可能性	
	早熟品种	中熟品种	晚熟品种	%
出苗—七叶	$\text{Ha}<-30$	$\text{Ha}<-35$	$\text{Ha}<-40$	55
出苗—抽雄	$\text{Ha}<-40$	$\text{Ha}<-45$	$\text{Ha}<-50$	70
出苗—乳熟	$\text{Ha}<-45$	$\text{Ha}<-50$	$\text{Ha}<-55$	78

分析法。研究在 minitab 操作环境中进行。

2 结果与分析

2.1 气象因子时空演变趋势

2.1.1 生育期变化趋势 生长季的光、温、水等气象因子的稳定性与冷害关系密切。通过对吉林东部 1980—2014 年 5—9 月的不同气候要素(图 2)研究表明: 5—9 月平均气温和初霜日数值均呈现显著的增加趋势, 5—9 月的总降水量和总日照时数呈波动下降趋势。5—9 月平均气温的突变检验(图 2A)显示 UF 与 UB 在 1994—1995 年的置信区间存在交点,而平均气温距平值在 1995 年之前以负值为主,1995 年之后为正距平,由此判断研究区生长季日平均气温在 1995 年发生了由低温向高温的突变,与全省的结果一致^[22],1986 年、1992 年、1995 年出现异常低温。19 世纪末 UF 曲线超过置信区间,气温显著上升,21 世纪达到最暖期。初霜日的 UF 和 UB 曲线在置信区间内 1984—1986 年有交点(图 2D),之后 UF 曲线呈现持续上升趋势,初霜日在突变后(1986—2014 年)比突变前(1980—1986 年)显著推迟 5 d。初霜日距平值年际变化规律与平均气温大致相同,在 21 世纪之前多为负值,80 年代初负距平值最大,之后初霜日表现显著推迟现象,距平值在 2002—2007 年连续 6 a 呈正值,达近 35 a 最大值。生长季总降水量的呈微弱的减少趋势,UF 与 UB 曲线在 2000 年的置信区间存在交点,降水量由偏多向偏少转变,气候趋于干旱。1985—1987 年、1994—1996 年、2005 年、2010 年表现为降水量异常偏多年份,其余年份降水偏少。总日照时数的 Mann-Kendall 交点过多,无明显突变点,1998 年之前 UF 小于 0,呈降低趋势;1998—2008 年 UF 大于 0,日照时数大于平均值,之后日照时数趋于减少,降水偏多年份日照时数较小。

近 35 a 来,吉林东部地区生长季各气象因子变化趋势空间分布不均(图 3),平均温度以及初霜日呈增加趋势,而生长季降水总量除南部地区呈总体下降趋势,总日照时数表现为东升西降趋势。生长季气温的平均倾

1.3.2 气候倾向率 描述气象因子长时间变化趋势的常用方法之一。通过建立气候变量 y 与时间 t 之间的一元线性回归模型,模型中的回归系数 b 用最小二乘法估计,回归系数 b 的 10 倍即为气候倾向率^[20]。当变化趋势率为正值说明该气象要素在这一时间段内是增加趋势;反之则为减少趋势。

1.3.3 Mann-Kendall 检验 M-K 是一种无分布检验方法又称非参数统计检验,在水文和气象领域的趋势分析和突变性检验中广泛应用^[21]。假设时间序列 x 具有 n 个样本量,构造秩序列 $S_k = \sum_{i=1}^k r_i$ ($k=1,2,\dots,n$),其中 $r_i = \begin{cases} 1, x_i > x_j \\ 0, x_i < x_j \end{cases}$,假设时间序列随机且独立,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E_{s_k}}{\sqrt{\text{var}_{s_k}}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中: $UF_1=0$; $E_{s_k}=k(k+1)/4$; $\text{Var}_{s_k}=k(k-1)(2k+t)/72$ 是累计数 S_k 的均值和方差。 UF_i 符合标准正态分布,当给定显著性水平 α ,查正态分布表,若 $|UF_i|>U_\alpha$ 则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列逆序 x_n,\dots,x_2,x_1 重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_i$, ($k=n,n-1,\dots,1$; $UB_1=0$)。分析绘出曲线,当超出某一置信区间的临界线时,表明数据序列具有上升或下降的趋势。若 UF_k 、 UB_k 两条曲线在临界线之间存在相交,那么突变开始的时间可认为是交点对应的时刻。

1.3.4 偏最小二乘回归 当自变量存在显著多重相关条件下,偏最小二乘回归是一种建立多因变量或单一因变量对多自变量的回归模型,集典型相关分析、主成分分析和多元线性回归分析于一体的多元统计

向率为 $0.35^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图 3A),气温升幅较大的为长白、敦化等高海拔和高纬度地区,升温中心位于长白地区($0.79^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),延吉、东岗、临江等中部地区气温升高幅度较小($0.25^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)。初霜日受温度升高影响整体呈延迟趋势,平均气候倾向率为 $2.12\text{ d}/10\text{ a}$ (图 3D),初霜日延迟幅度较大的为延吉、二道、长白等东部地区,集安、东岗等地区变化幅度较小。研究区生长季降水量及日照时数变化趋势不均(图 3B,图 3C)。南部地区总降水量趋于增多($2.7\text{ mm}/10\text{ a}$),而靖宇以北地区,尤其是敦化、梅河口等西部地区趋于干旱($-4.8\text{ mm}/10\text{ a}$);延吉、二道、东岗和长白等东部地区总日照时

数表现为显著的增加趋势($3.9\text{ h}/10\text{ a}$),可能与云量减少、降水量减少有关,而敦化、靖宇、临江等中西部地区总日照时数表现为下降趋势($-4.8\text{ h}/10\text{ a}$)。根据气象要素变化趋势的聚类分析结果,将研究区分为 4 种类型:第一类为暖干多日照晚霜型,与研究区气候变化趋势整体保持一致,包括延吉、二道、长白等东部地区;第 2 类为暖湿相对早霜型,通化、集安等南部地区受降水、初霜日的影响较大;第 3 类为轻微暖湿但严重寡照型,其中靖宇、临江等中部地区受寡照影响显著,可能与山地多水汽有关;第 4 类暖干寡照相对早霜型,敦化、梅河口等地干旱且少日照。

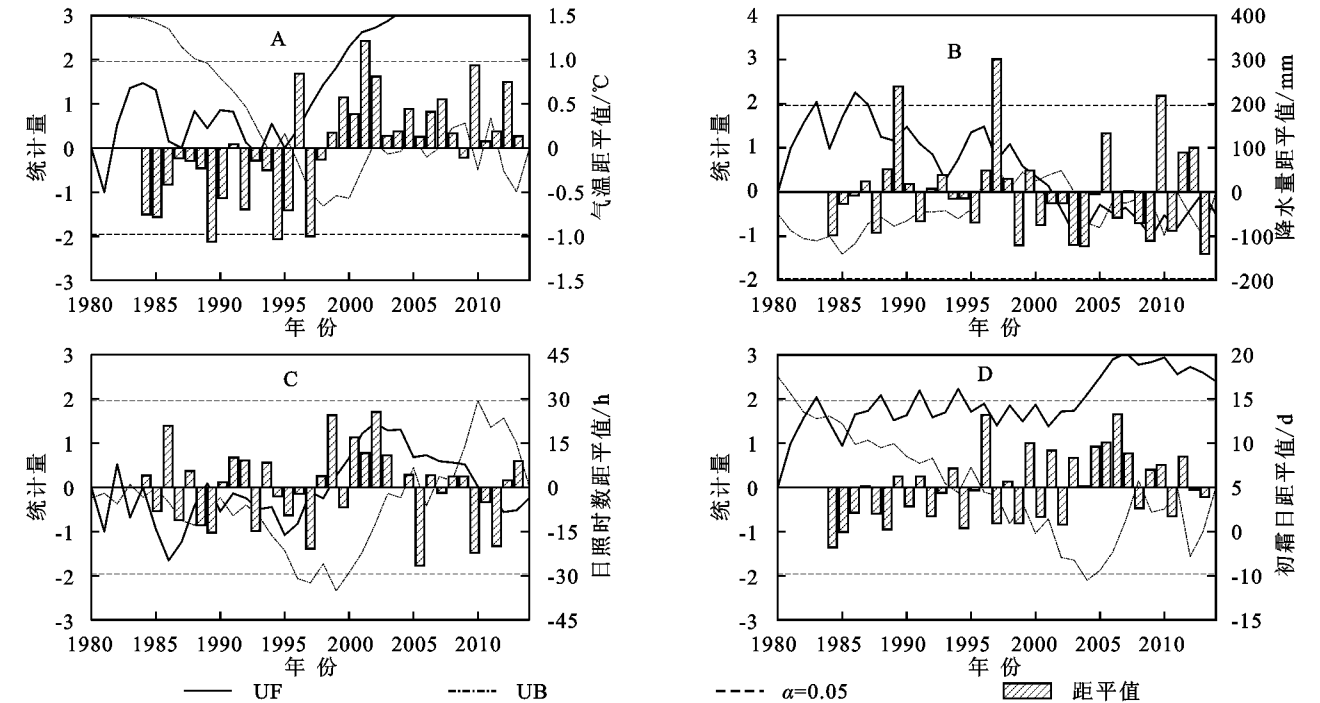


图 2 1980—2014 年吉林省东部气象因子距平值及突变判别

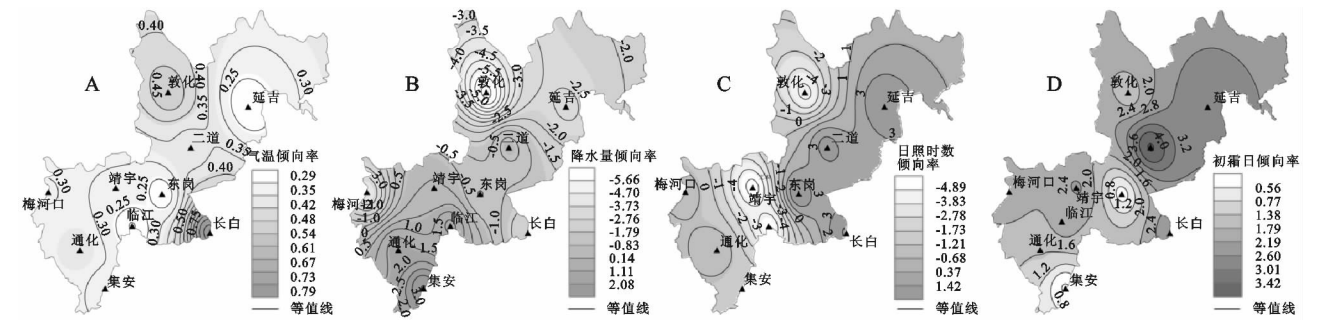


图 3 1980—2014 年吉林东部气象因子的气候倾向率

2.1.2 生育阶段变化趋势 由图 4 可以看出,玉米在出苗期—乳熟期温度、降水、日照时数数值逐渐上升。1980—2014 年生长季温度呈现显著增长趋势,而降水量、日照时数表现为波动下降。日平均温度在出苗期—抽雄期显著上升($0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),抽雄期—乳熟期波动较小($0.34^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)。21 世纪之前,玉米在全生育期受低温胁迫,80 年代初期及 90 年代出苗期—七叶期的气温波动显著,负距平值较大,而七叶期—乳熟期负距平值较

小,对生育前期具有微弱的温度补偿效应;80 年代中后期,玉米在七叶期—乳熟期遭受低温作用明显,21 世纪气候变暖显著,对全球气候变暖正响应,但 2008 年、2009 年出现异常低温现象。作物在生长季降水量逐渐增加,抽雄期—乳熟期波动变化显著,与雨带的季节性移动密切相关。降水量在 1980—2014 年际间呈现显著下降趋势,其中七叶期—抽雄期波动下降趋势显著($9.11\text{ mm}/10\text{ a}$),出苗期—七叶期波动较小。

80 年代前期至 90 年代中期,作物前期生长阶段降水量偏多,在 1985 年、1995 年抽雄期—乳熟期出现极端降水现象;90 年代后期,降水量负距平偏多;21 世纪以来,全球气候波动幅度扩大导致极端干旱事件发生频率增加^[23-24]。随着太阳直射点北移,作物生长期内白昼越长,日照时数不断增加。但在 1980—2014 年,受云量、大气污染物等影响,生长阶段累积日照时数呈现减小趋势,七叶期—乳熟期表现为显著下降趋势(9 h/10 a),在生长前期较稳定。

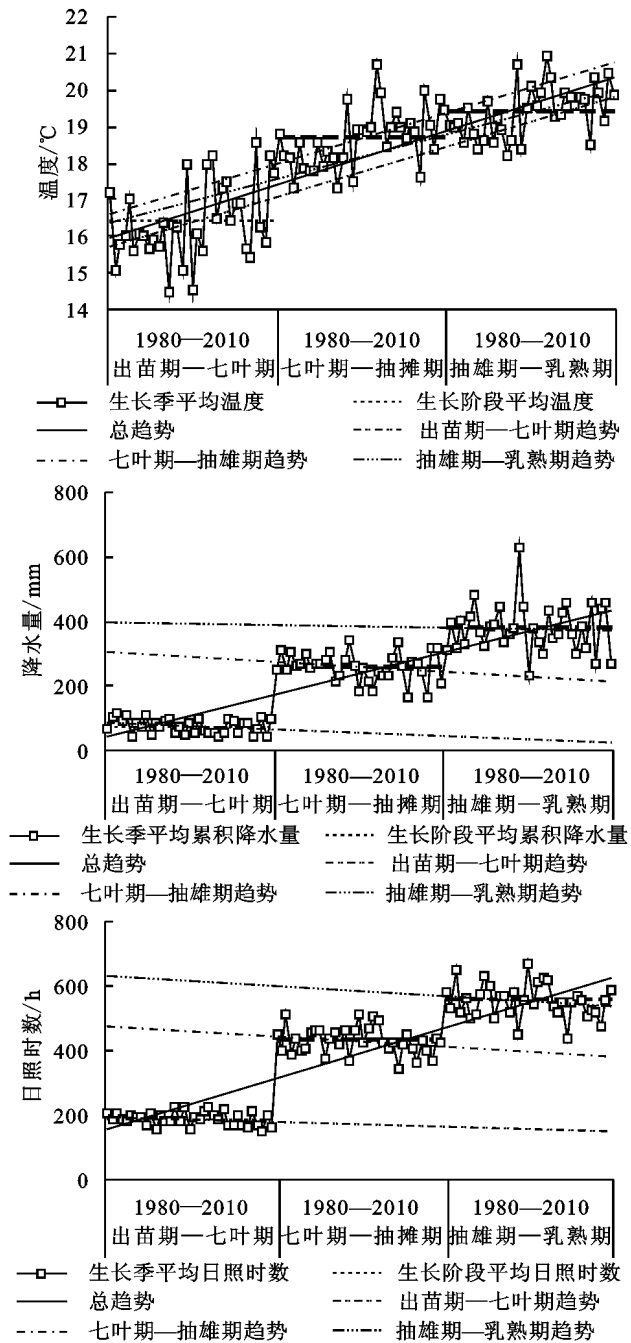


图 4 1980—2014 年气象因子的年际变化及生长阶段趋势

2.2 玉米延迟型冷害时空变化特征

2.2.1 时间变化特征 研究区冷害年代间分布不均(表 3)。气候变暖背景下,玉米延迟型冷害整体呈现

频率、强度降低趋势。80 年代到 21 世纪初冷害事件发生频繁,与低温阴雨、早霜、寡照等相关(图 2)。从全生育期来看,80 年代冷害发生频率高,强度大,重度冷害发生频率约为总频率的 80%左右(表 3),出苗期—抽雄期可能发生冷害的频率为 20%,抽雄期—乳熟期受降水日照波动影响导致冷害发生频率上升 14%;90 年代全生育期冷害发生频率显著下降,强度略有增加,与全球极端气候事件增加有关。其中出苗期—七叶期受极端低温影响,冷害可能发生频率达 50%左右,而夏季温度升高的热量补偿效应导致生长后期冷害发生频率下降;21 世纪初受全球气温显著上升影响,冷害发生次数减少、强度降低,多在出苗期—七叶期受低温胁迫发生轻度冷害。从冷害发生的站数可以看出(图 5),2000 年之前冷害发生范围广,强度大,次数频繁。80 年代全生育期发生冷害站数要普遍高于出苗期—抽雄期可能发生冷害站数,结合气象要素分析(图 4)可知,秋季降温快,初霜日提前,易籽粒灌浆期缩短而造成冷害;20 世纪 90 年代出苗期—乳熟期评估结果与全生育期基本吻合,与抽雄期—乳熟期的低温胁迫密切相关;21 世纪以来全球气候变暖,大范围冷害少有发生,但作物不同生育阶段的极端气候影响导致阶段性热量不足,不排除未来部分地区遭受极端低温的可能。

表 3 吉林省东部地区不同时期玉米延迟型冷害发生频率

年代	全生育冷害频率			生育阶段冷害频率		
	轻度	中度	重度	出苗期— 七叶期	出苗期— 抽雄期	出苗期— 乳熟期
1980s	0.13	0.08	0.40	0.22	0.20	0.34
1990s	0.03	0.02	0.29	0.50	0.44	0.46
2000s	0.03	0.00	0.00	0.31	0.29	0.31

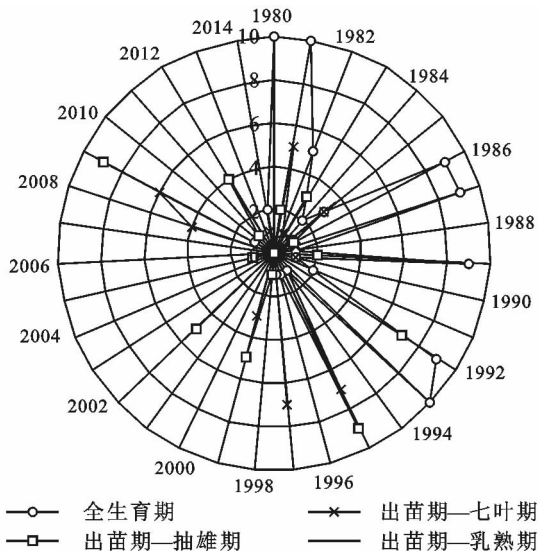


图 5 1980—2014 年吉林省东部地区不同生长阶段发生玉米延迟型冷害站数

2.2.2 空间变化特征 玉米在各生育阶段冷害发生频率的空间分布不同(图 6)。全生育期冷害发生频率明显高于生育阶段冷害评估结果,冷害平均发生频率在 23%~50%,其中延吉、二道、东岗等地呈现东北—西南走向的冷害发生低频率带,主要是由于这些地区纬度位置相对较低、海拔不高,且气温波动较小,日照充足,直线以西、以东地区出现小幅度频率增加,敦化、梅河口等西部地区表现为干旱、冷害并行趋势,东部山地使来自太平洋的湿润气流抬升,降水充沛,多表现为阴雨冷害,但降水量呈微弱降低趋势。生育阶段可能发生冷害的动态评估结果显示高频区不断

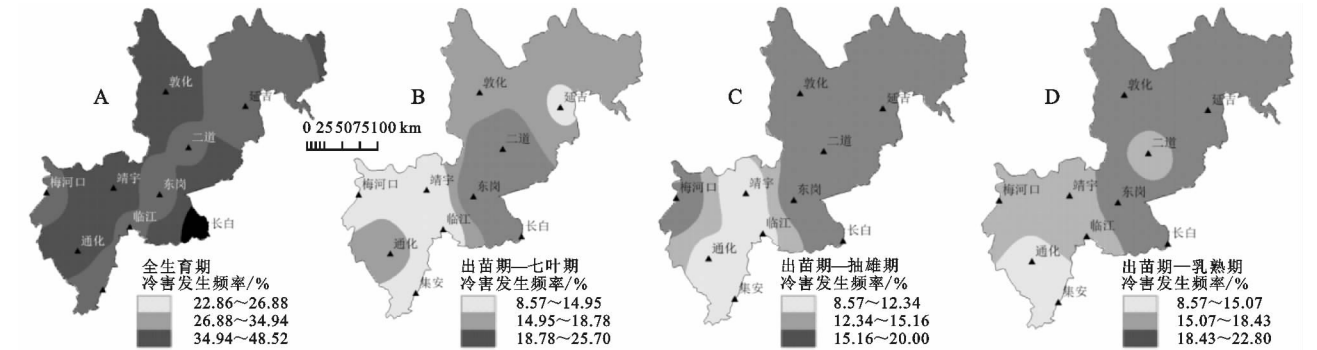


图 6 1980—2014 年吉林省东部地区不同生长阶段玉米延迟型冷害发生情况

2.3 冷害年低温与关键气象因子的关系

玉米是典型喜温喜光植物,在不同生长阶段受到温度、降水、日照等气候因子胁迫易发生冷害,例如出苗期低温阴雨易造成种子霉变坏死,拔节后期—孕穗前期低温寡照易造成植株矮小等。根据气象行业标准中玉米延迟型冷害指标体系,对 1980 年代以来吉林省东部不同站点玉米种植期进行冷害判定发现,近 35 a 吉林省东部玉米生长期共发生 20 次不同程度的低温冷害,各站点冷害年情况不同。对各站点冷害发生年的玉米不同生长阶段平均气温与总降水量、总日照时数和初霜日进行相关性分析,并按照站点海拔高低自上而下排列,结果表明:冷害年各生长阶段平均气温与总降水量的相关性受海拔影响,海拔越高,气温与降水呈负相关关系持续时间越长。这主要是因为随着海拔的升高,温度降低,有利于水汽凝结,降水量增加,海拔较高的山区多低温阴雨。气温与降水在玉米生长时期 1(出苗期—七叶期)表现为负相关,部分地区 $r < -0.6$,出苗期—七叶期、出苗期—乳熟期温度上升,雨带的移动导致区域降水整体增多,两者逐渐表现为正相关关系。冷害年日照时数与气温呈现显著正相关。冷害年玉米生长前期降水充足,云量多,日照不足,温度偏低,易发生阴雨寡照型冷害,后期部分地区地表现为负相关关系。冷害年初霜日与平均气温表现为弱相关性,前期为负相关关系,后期为正相关关系。

向高纬度、低纬度地区扩大。出苗期—七叶期冷害发生频率呈中间向东北、西南两侧减弱趋势,中部地区平均海拔在 500 m 以上,敦化、靖宇受寡照影响,长白、敦化气温倾向率较大,干旱化严重,东北、西南两侧地区气温波动小,不易发生高频率冷害。出苗期—抽雄期冷害可能发生较高频率区域向北扩至敦化、延吉、梅河口等地区,而冷害发生低频区与降水正倾向率区域基本吻合,说明整体趋于发生干旱型冷害;出苗期—乳熟期冷害发生区域向南延伸到通化附近,可能与 7 月—8 月副高脊线跨越北纬 30°,雨带移动至东北地区密切相关^[25]。

对各参数进行归一化处理,利用偏最小二乘法对不同时期气象因子进行回归建模,结果如表 4 所示:回归模型对冷害年气温在玉米出苗期—抽雄期拟合的显著性检验具有统计学意义($p < 0.01$),说明玉米出苗期—抽雄期气温受降水、日照时数影响显著,初霜日的影响可以忽略不计。大部分地区回归模型拟合结果较好,梅河口、靖宇、集安的模型拟合程度最佳。

表 4 冷害年气温与气象因子的回归分析

站点	偏最小二乘回归方程	R^2	p
通化	$T_{1-2} = -0.098410 - 0.492828P_{1-2} + 0.996184S_{1-2}$	0.72	<0.001
敦化	$T_{1-2} = -0.002530 + 0.393877P_{1-2} + 0.851258S_{1-2}$	0.71	<0.001
二道	$T_{1-2} = 0.003568 + 0.581829P_{1-2} + 0.657182S_{1-2}$	0.69	<0.001
长白	$T_{1-2} = 0.030546 + 0.376142P_{1-2} + 0.846365S_{1-2}$	0.74	<0.001
东岗	$T_{1-2} = 0.193478 + 0.0517049P_{1-2} + 0.568629S_{1-2}$	0.76	<0.001
集安	$T_{1-2} = -0.230472 + 0.934804P_{1-2} + 0.802966S_{1-2}$	0.86	<0.001
梅河口	$T_{1-2} = 0.063601 + 0.636878P_{1-2} + 0.685767S_{1-2}$	0.90	<0.001
靖宇	$T_{1-2} = 0.218789 - 0.326647P_{1-2} + 0.729841S_{1-2}$	0.88	<0.001

注: T_{1-2} 、 P_{1-2} 、 S_{1-2} 分别为冷害年出苗—抽雄期平均温度、累积降水量、累积日照时数。

3 结论

(1) 气象因子与冷害频率的时空分布规律对比分析发现,低温是玉米延迟型冷害时空分布规律形成的主导因素,其次极端降水对冷害事件影响显著。20

世纪 80 年代以来研究区气候趋于暖干,冷害频率呈下降趋势,而 20 世纪 90 年代中期降水异常导致冷害强度略有增加。研究区中部东北—西南走向的冷害低频带,与气温倾向率的低值带基本吻合,以西为低温干旱型冷害发生区域,东南区多低温阴雨。

(2) 结合作物生长阶段研究显示,玉米遭受低温胁迫的生长阶段主要集中在出苗期—抽雄期。受季风气候影响,出苗期—七叶期热量条件较差,低温冷害多发,冷害发生频率为中部海拔较高区向东北、西南两侧低海拔区减弱趋势;七叶期—抽雄期降水充足,日照时数偏少,易发生低温阴雨事件,冷害发生频率呈东北高纬度区向西南低纬度区逐渐递减趋势。

(3) 冷害年气温与各气象因子的偏相关性系数的排序为降水>日照时数>初霜日。玉米出苗期—抽雄期气温与降水、日照相关性显著,受初霜日影响较小。冷害年气温与降水、日照的相关性受海拔影响,即海拔较高的山区多阴雨天气,云量较多,热量不足,冷害易发。本研究区别于以往基于单一温度指标对冷害研究,关注复杂的天气变化过程下冷害的变化特征,结合作物的生长发育期多角度阐述冷害致灾因子的复杂性,揭示了气候变化背景下玉米延迟型冷害时空演变规律。研究发现冷害不仅受低温影响,而且与阴雨、寡照等天气相关。但本研究仅从致灾因子的危险性角度出发,缺少对作物脆弱性探究。随着全球气候波动的不规律性增强,极端天气事件频发,灾害评估不能单从某一方面考虑,应该着眼于复杂的天气变化,结合作物的生长发育情况,全面综合的进行灾害时空演变规律的评估。因此,多因素对单灾种影响以及多灾种的综合动态变化规律将成为以后的研究重点。

参考文献:

- [1] 王书裕. 我国作物冷害研究的进展[J]. 气象科技, 1984, 12(4): 75-79.
- [2] 王培娟, 韩丽娟, 周广胜, 等. 气候变暖对东北三省春玉米布局的可能影响及其应对策略[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1343-1355.
- [3] Solomon S. IPCC: Climate change the physical science basis[C]// AGU Fall Meeting Abstracts, 2007.
- [4] 王春乙. 中国重大农业气象灾害研究[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [5] 张继权. 农业气象灾害风险评价、预警及管理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [6] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴 2008[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [7] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴 2011[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [8] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴 2013[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [9] 王远皓, 王春乙, 张雪芬. 作物低温冷害指标及风险评估研究进展[J]. 气象科技, 2008, 36(3): 310-317.
- [10] 檀艳静, 张佳华, 姚凤梅, 等. 中国作物低温冷害监测与模拟预报研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1920-1927.
- [11] 纪瑞鹏, 于文颖, 冯锐, 等. 寒地水稻障碍型冷害指数构建及应用: 以辽宁为例[J]. 地理科学进展, 2017, 36(4): 437-445.
- [12] 王春乙, 张继权, 霍治国, 等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J]. 气象学报, 2015(1): 1-19.
- [13] 徐玉秀, 蒋姗姗, 周福然, 等. 1981—2010 年锦州地区玉米生育期气象因子变化及其与气象产量的关系[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(5): 82-90.
- [14] 范磊, 郑国清, 赵全志, 等. 河南省水稻气象灾害因子分析及主要灾害发生区划研究[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(6): 162-168, 175.
- [15] 韩荣青, 陈丽娟, 李维京, 等. 2—5 月我国低温连阴雨和南方冷害时空特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(3): 312-320.
- [16] 孟祥君, 吴正方, 杜海波, 等. 1961—2010 年吉林省 5—9 月各月发生的低温冷害变化特征[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2012, 44(3): 112-117.
- [17] 彭聪. 近 50 年吉林东部地区农业气候条件变化及农业生产对气候变化的响应研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [18] 中国气象局. QX/T167-2012 北方春玉米冷害评估技术规范[S]. 北京: 气象出版社, 2013.
- [19] 曲辉辉, 姜丽霞, 王冬冬. 气候变化对黑龙江省水稻障碍型冷害的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 769-777.
- [20] 田宝星, 宫丽娟, 杨帆, 等. 黑龙江省春季低温指数小波分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 342-345, 350.
- [21] 史佳良, 王秀茹, 李淑芳, 等. 近 50 年来河南省气温和降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 151-156.
- [22] 董满宇, 吴正方. 近 50 年来吉林省气温和降水变化趋势分析[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2007, 39(3): 114-119.
- [23] 李宝, 胡阳, 汪光胜, 等. 江淮分水岭区农作物干旱时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 227-232, 237.
- [24] 王蕊, 张继权, 郭恩亮, 等. 近 55 a 吉林中西部玉米生长季旱涝时空特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 186-197.
- [25] 刘慧斌, 温敏, 何金海, 等. 东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响[J]. 大气科学, 2012, 36(5): 959-973.